

## بررسی تاثیر پارامترهای جوشکاری بر اندازه‌ی دکمه‌ی جوش در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای آلیاژهای منیزیم

محمد صدیقی<sup>۱\*</sup>، فرشاد نظری<sup>۲</sup> و داود افشاری<sup>۳</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
<p><b>واژگان کلیدی:</b> جوش مقاومتی نقطه‌ای، آلیاژ منیزیم، مدل المان محدود، طراحی آزمایش DOE، دکمه‌ی جوش.</p>	<p>در این مطالعه تاثیر پارامترهای جوشکاری بر اندازه‌ی دکمه‌ی جوش در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای آلیاژهای منیزیم مورد بررسی قرار گرفته و میزان تاثیرگذاری هر یک از پارامترها مشخص شده است. برای این کار میزان اهمیت هر پارامتر به وسیله طراحی آزمایش DOE معین گردید و از یک مدل المان محدود دو بعدی متقارن کوپل شده به صورت مکانیکی-الکتریکی-حرارتی، برای پیش بینی توزیع دما و رشد دکمه‌ی جوش در طی مراحل جوشکاری استفاده شد. جهت اعتبارسنجی نتایج بدست آمده از شبیه سازی با آزمایش‌های عملی در دو حالت استفاده از جریان مستقیم (DC) و جریان متناوب (AC) مقایسه شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد با افزایش شدت جریان و زمان اعمال جریان اندازه‌ی دکمه‌ی جوش افزایش می‌یابد همچنین نیروی الکتروود و زمان اعمال نیرو بر اندازه‌ی دکمه‌ی جوش تاثیر چندانی ندارد. در این بررسی نوع منبع جریان نیز مورد مطالعه قرار گرفت و مشخص شد در شرایط برابر منبع جریان DC نسبت به AC دکمه‌ی جوش بزرگتری ایجاد می‌کند.</p>

### ۱- مقدمه

از روش‌های سریع مونتاژ می‌باشد که به صورت گسترده در صنعت اتومبیل‌سازی استفاده می‌شود. از عوامل توسعه این نوع جوش می‌توان به کاربرد برای دامنه وسیعی از فلزات، سرعت زیاد، هزینه‌ی کم و پتانسیل بالا جهت اتوماسیون اشاره کرد. بنابراین بررسی جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای آلیاژهای منیزیم امری ضرورتی به نظر می‌رسد. مونیتز و همکارانش [۱] در سال ۲۰۰۲ اولین پژوهش را جهت امکان‌سنجی جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای آلیاژهای منیزیم انجام دادند. آنها برای این کار دو ماده‌ی Mg-AZ31 و Mg-AM50 را مورد آزمایش قرار دادند. پس از آن در سال ۲۰۰۵ وانگ و همکارانش [۲] به بررسی تأثیر کیفیت سطح در پدیده‌ی پاشش مذاب (Expulsion) پرداختند و دریافتند که با کاهش کیفیت سطح، پاشش

امروزه استفاده از مواد سبک در صنایع مختلف اتومبیل‌سازی و حمل‌ونقل بسیار اهمیت پیدا کرده است زیرا این مواد باعث می‌شوند در مصرف انرژی صرفه‌جویی شده و گازهای مضر کمتری تولید شود. بر این اساس استفاده از فلز منیزیم و آلیاژهای مختلف آن در حال افزایش است زیرا این فلز دارای چگالی ۰/۷۵ آلومینیوم و ۰/۲ فولاد است، استحکام بالایی نسبت به چگالی خود دارد و به راحتی بازیافت می‌شود. جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای یکی

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: sedighi@iust.ac.ir

۱. استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

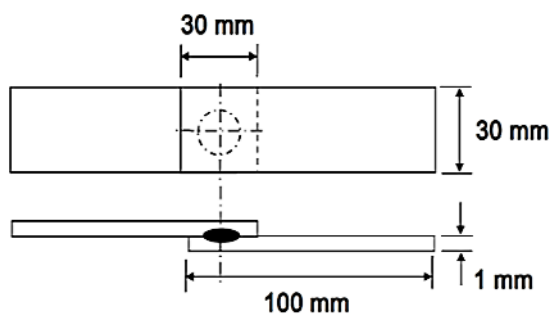
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

۳. استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان

بر ریز ساختار، شرایط انجماد و شکل‌پذیری جوش را روی ورق AZ31 منیزیم مطالعه کردند. آنها دریافتند که ناحیه جوشکاری دارای ریزساختار ستونی و موازی است و سختی در این ناحیه نسبت به فلز پایه کمتر می‌باشد. با توجه به توضیحات بیان شده می‌توان مشاهده کرد که برخی از پارامترهای جوشکاری مانند نیرو، زمان اعمال نیرو و تاثیر متقابل پارامترها در این فرآیند مطالعه نشده و شبیه‌سازی جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای منیزیم صورت نگرفته است. به همین سبب در این مطالعه به وسیله طراحی آزمایش DOE اهمیت و تاثیر متقابل پارامترها بررسی شده و با استفاده از یک مدل مکانیکی-الکتریکی-حرارتی کوپل شده در نرم‌افزار ANSYS12.1 تاثیر پارامترهای شدت جریان، زمان اعمال جریان، نیرو، زمان اعمال نیرو و منبع تولید جریان بر اندازه‌ی دکمه‌ی جوش در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای آلایژ AZ31 منیزیم مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- شرایط آزمایش

جهت مطالعه‌ی پارامترهای مختلف، نمونه‌هایی با ابعاد  $1\text{mm} \times 30\text{mm} \times 100\text{mm}$  و از جنس ورق AZ31 منیزیم مورد بررسی قرار گرفته است. اطلاعات مربوط به خواص فیزیکی و مکانیکی این آلایژ به صورت وابسته به دما در جداول ۱ و ۲ آمده است.



شکل ۱- ابعاد نمونه‌های مورد آزمایش

مذاب افزایش می‌یابد. سان و همکارانش [۳] در سال ۲۰۰۷ به بررسی تأثیرات شدت جریان و کیفیت سطح بر اندازه و استحکام دکمه‌ی جوش پرداختند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش شدت جریان تا مقدار بهینه قطر و استحکام دکمه‌ی جوش افزایش می‌یابد. لیو و همکارانش در سال ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ [۴-۵] به بررسی تأثیرات شدت جریان، زمان جوشکاری و کیفیت سطح روی اندازه دکمه‌ی جوش پرداختند و دریافتند که با افزایش شدت جریان و زمان آن قطر دکمه‌ی جوش افزایش می‌یابد. در سال ۲۰۱۰ ژو [۶] و شی [۷] با مطالعه روی ورق AZ31 منیزیم، پارامترهای جوشکاری، کیفیت سطح تماس و امکان‌سنجی استفاده از روش ورق پشتیبان (Cover Plate) را بررسی کردند و دریافتند که با این روش می‌توان در شدت جریان و زمان کمتر به جوش مطلوب دست یافت. سیاو و همکارانش نیز در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱ [۸-۹] به مطالعه‌ای روی شرایط ذوب و انجماد دکمه‌ی جوش، ریز ساختار و عمر خستگی آن پرداختند. آنها ناحیه جوشکاری را به ۴ بخش تقسیم و بیان کردند که دکمه‌ی جوش با ساختار ریزتر عمرخستگی بالاتری دارد. وانگ و همکارانش [۱۰] در سال ۲۰۱۱ تأثیرات نوع منبع جریان روی جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای منیزیم را مطالعه کردند و برای بررسی خود از دو منبع جریان مستقیم (Inverter DC) و متناوب (AC) با فرکانس ۶۰ Hz استفاده کردند. آنها دریافتند که با استفاده از منبع جریان مستقیم استحکام دکمه جوش افزایش می‌یابد اما احتمال وقوع پاشش مذاب نیز بیشتر می‌شود. در همین سال بهروش و همکارانش [۱۱] جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای منیزیم را زیر بارهای کششی سیکلی و شکست مورد بررسی قرار دادند و بیان کردند که منیزیم رفتاری مانند فولاد و آلومینیوم داشته و استحکام و قطر دکمه جوش دارای رابطه‌ی خطی هستند. کیشور بابو [۱۲] و مونتیل [۱۳] در سال ۲۰۱۲ تأثیر پارامترهای جوشکاری

جدول ۱- خواص فیزیکی وابسته به دما برای آلیاژ AZ31 [۱۴-۱۵]

۵۳۸	۴۲۸	۳۰۰	۲۰۰	۱۰۰	۲۵	°C	ضریب انبساط حرارتی		
۲/۸۹	۲/۸۴	۲/۷۹	۲/۷	۲/۶۴	۲/۶	$^{\circ}C^{-1} \times E - 5$			
۶۶۸	۵۰۰	۴۳۰	۴۰۰	۳۰۰	۲۰۰	۱۰۰	۲۵	رسانایی حرارتی	
۱۳۷	۹۵	۱۰۷	۱۰۴	۹۸/۴	۹۵/۸	۹۰/۵	۸۴/۷		$w/m.k$
۶۰۰	۵۲۷	۴۲۷	۳۲۷	۲۲۷	۱۲۷	۷۷	۲۵	مقاومت الکتریکی	
۲۰	۱۸/۷	۱۷	۱۵/۲	۱۳/۵	۱۱/۵	۱۱	۱۰		$Ohm.m \times E - 8$
۴۰۰	۳۵۰	۳۰۰	۲۰۰	۱۰۰	۵۰	۲۵	°C	ظرفیت گرمایی ویژه	
۱۳۳۰	۱۲۹۰	۱۲۴۰	۱۱۷۰	۱۱۳۰	۱۱۰۰	۱۰۵۰	$j/Kg.k$		
							۱۷۷۰	$Kg/m^3$	چگالی

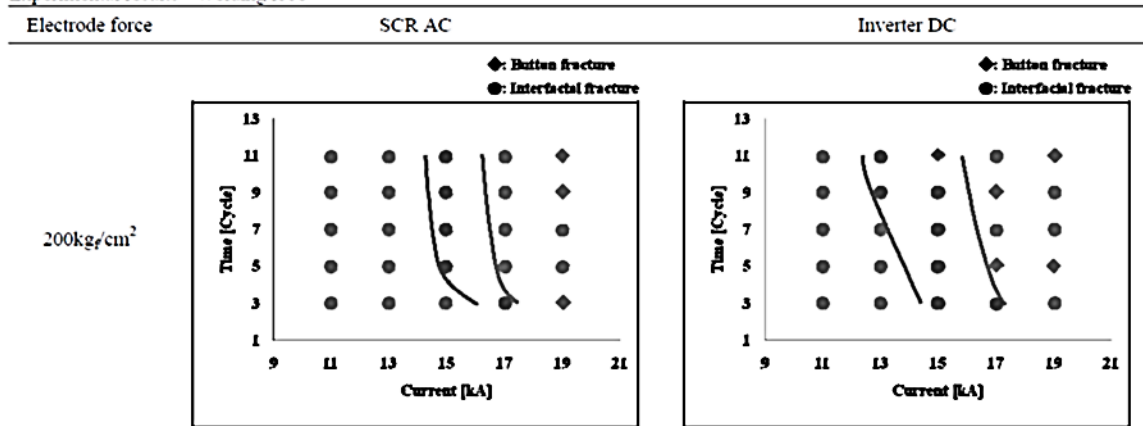
جدول ۲- خواص مکانیکی وابسته به دما برای آلیاژ AZ31 [۱۴-۱۵]

۴۵۰	۴۰۰	۳۰۰	۲۴۳	۲۰۰	۱۵۰	۱۰۰	۲۵	°C	مدول یانگ	
۲۲	۲۴/۵	۲۹/۶	۳۵/۳	۳۹/۹	۴۲/۶	۴۵	۴۵	$GPa$		
۵۰۰	۴۵۰	۴۰۰	۳۵۰	۳۰۰	۲۵۰	۲۰۰	۱۰۰	۲۵	استحکام تسلیم	
۳۸	۵۱	۶۸/۹	۹۵/۲	۱۲۲	۱۲۵	۱۳۷	۱۴۵/۹۰	۱۵۴/۸		$MPa$
									۱۷۷۰	ضریب پواسون

انجام جوش ناقص و نداشتن استحکام کافی عامل محدود کننده از پایین و اتفاق افتادن پاشش مذاب تعیین کننده‌ی حد بالای نمودار است. در هر بخش آزمایش‌ها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که همواره دکمه‌ی جوش در محدوده‌ی مجاز قرار گرفته و جوش سالمی داشته باشیم. پارامترهای انتخاب شده در جدول ۳ بیان شده است.

جهت تعیین میزان تأثیرگذاری هر پارامتر روی اندازه دکمه‌ی جوش و تنش پسماند، از نرم‌افزار Minitab، روش طراحی آزمایش DOE و آزمون "Full Factorial" استفاده شده است. این روش نیازمند استفاده از مقادیر کمینه و بیشینه هر پارامتر می‌باشد. جهت معین کردن دامنه شدت جریان و زمان جوشکاری از نمودار ارائه شده توسط وانگ [۱۰] (شکل ۲) استفاده شده است که در آن

Experimental results - Welding lobe



شکل ۲- نمودار حد جوشکاری برای ورق ۱mm از جنس AZ31 منیزیم [۱۰]

جدول ۳- پارامترهای انتخاب شده جهت انجام آزمایش

منبع جریان	شدت جریان (KA)	زمان اعمال جریان (Cycle)	نیرو (KN)	زمان اعمال نیرو (Cycle)
AC	۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸	۷	۲	۶
	۱۶	۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹	۲	۶
	۱۶	۷	۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵، ۳، ۳/۵، ۴	۶
	۱۶	۷	۲	۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰
DC	۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷	۷	۲	۶

## ۳- معادلات حاکم بر فرآیند

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( k \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{k}{r} \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

انتقال گرما به روش رسانش بین سطوح در تماس با استفاده از فرمول (۴) تعریف می‌شود که در آن  $q$  گرمای منتقل شده بین سطوح در تماس،  $TCC$  ضریب رسانایی حرارتی و  $T_c$  و  $T_t$  دمای نقاط سطوح در تماس می‌باشند.

$$q = TCC \times (T_t - T_c) \quad (4)$$

جهت تعریف ضریب رسانایی حرارتی ( $TCC$ ) از رابطه‌ی (۵) استفاده شده است که در آن  $K_s$  رسانایی حرارتی سطوح،  $m$  شیب ناهمواری‌ها،  $\sigma$  کیفیت سطوح تماس،  $P$  فشار وارد بر سطح و  $E'$  مدول الاستیک معادل می‌باشند [۱۶].

$$TCC = 1.54 \times \left( \frac{\sqrt{2} P}{m E'} \right)^{0.94} \times \frac{m K_s}{\sigma} \quad (5)$$

خواص الکتریکی برای دو سطح در تماس با استفاده از رابطه‌ی (۶) تعریف شده است که در آن  $J$  چگالی جریان الکتریکی،  $ECC$  ضریب رسانایی الکتریکی و  $V_t$  و  $V_c$  پتانسیل الکتریکی در نقاط سطوح در تماس می‌باشند.

$$J = ECC \times (V_t - V_c) \quad (6)$$

جهت تعریف  $ECC$  از روابط (۷) و (۸) استفاده شده است که در آنها  $R$  مقاومت الکتریکی،  $l$  طول المان‌ها،  $A$  مساحت ناحیه تماس و  $\sigma_Y$  تنش تسلیم ماده می‌باشد [۱۷].

$$R(T^{\circ}C) = \frac{A}{l} \times R(20^{\circ}C) \times \sqrt{\frac{\sigma_Y(T^{\circ}C)}{\sigma_Y(20^{\circ}C)}} \quad (7)$$

فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای فرآیندی پیچیده است که در آن عوامل گرمایی، الکتریکی، مکانیکی و متالورژیکی دخیل هستند. جهت مدل کردن این فرآیند نیاز به استخراج روابط مربوط به هر یک از این پدیده‌ها می‌باشد. برای شبیه‌سازی، فرآیند به صورت متقارن در نظر گرفته شده و معادلات استفاده شده در مدل‌سازی، دو بعدی و در مختصات استوانه‌ای هستند. رابطه‌ی (۱) معادله‌ی حاکم بر پتانسیل الکتریکی می‌باشد که با  $\phi$  نمایش داده شده و  $r$  فاصله‌ی شعاعی،  $Z$  فاصله در راستای محور دستگاه استوانه‌ای و  $\sigma$  هدایت الکتریکی است. حل معادله، توزیع پتانسیل الکتریکی در مدل را نمایش می‌دهد.

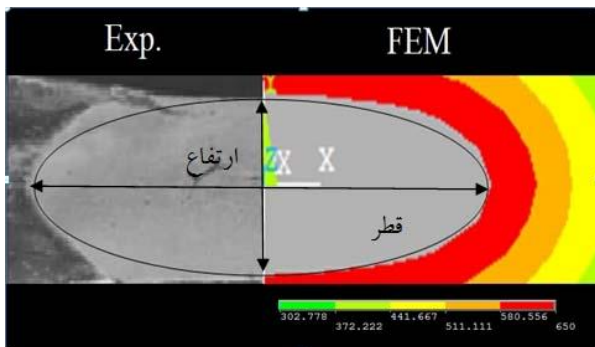
$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \sigma \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + \frac{\sigma}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) = 0 \quad (1)$$

مدل حرارتی شامل بررسی دینامیکی دما در نتیجه‌ی تغییرات جریان الکتریکی و تولید گرما در مدل و انتقال حرارت از طریق رسانایی و همرفت می‌باشد و توسط معادله‌های (۲) و (۳) بیان شده است.  $q$  حرارت تولید شده در اثر پتانسیل الکتریکی،  $R$  مقاومت ماده،  $\rho$  چگالی،  $C$  ظرفیت گرمایی و  $k$  هدایت حرارتی می‌باشند که وابسته به دما هستند. در این روابط  $T$  توزیع دما و  $t$  زمان را بیان می‌کند. این مدل در سرتاسر فرآیند جوش فعال است.

$$q = \frac{\phi^2 t}{R} \quad (2)$$

### ۵- اعتبارسنجی

جهت اعتبارسنجی مدل المان محدود، نتایج شبیه‌سازی با نتایج بدست آمده توسط وانگ [۱۰] از تست‌های آزمایشگاهی روی ورق AZ31 با ضخامت ۱mm مقایسه شده‌اند. آزمایش‌ها در زمان جوشکاری ۹ سیکل با استفاده از نیرو ۲۰۰۰N و در چهار سطح شدت جریان انجام گرفته و دو منبع جریان مستقیم (DC) و متناوب سینوسی (AC) با فرکانس ۶۰ هرتز بررسی شده‌اند. نتایج بدست آمده با داده‌های حاصل از آزمایش‌های تجربی بر اساس قطر دکمه‌ی جوش مقایسه شده است و همانطور که در شکل و جدول ۴ مشاهده می‌شود نتایج المان محدود با نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی نزدیکی مطلوبی دارند. آلیاژ AZ31 منیزیم دارای دمای ذوب ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد که جهت تفکیک مرز ناحیه‌ی مذاب و جامد در نظر گرفته شده است. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود ناحیه‌ی خاکستری رنگ ناحیه مذاب (دکمه‌ی جوش) و نواحی دارای کانتور رنگی قسمت‌های جامد ورق می‌باشند.



شکل ۴- مقایسه‌ی شکل دکمه‌ی جوش شبیه‌سازی شده با نمونه‌ی تجربی متالوگرافی شده‌ی وانگ [۱۰]

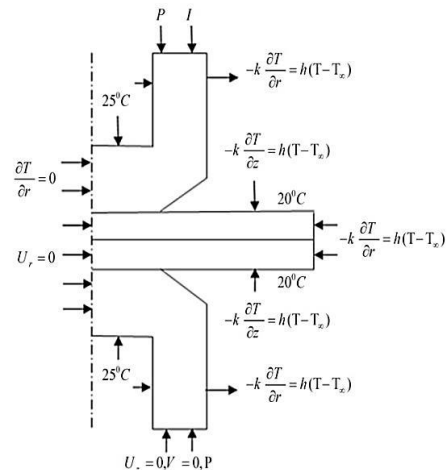
$$ECC = \frac{1}{R(T^{\circ}C)} \quad (8)$$

همچنین جریان سینوسی با استفاده از رابطه‌ی (۹) تعریف شده که در این معادلات  $I_m$  مقدار ماکزیمم جریان بر حسب آمپر،  $f$  فرکانس بر حسب هرتز (Hz) و  $t$  زمان بر حسب ثانیه می‌باشد.

$$I = I_m \sin(2\pi ft) \quad (9)$$

### ۴- شرایط مرزی

در شکل ۳ کلیه شرایط مرزی مکانیکی، الکتریکی و حرارتی بکار گرفته شده در مدل اجزا محدود، ارائه شده است. در مرحله‌ی جوشکاری جریان به صورت یکنواخت از سطح فوقانی الکتروود بالایی وارد شده و پس از عبور از منطقه تماس ما بین الکتروود-ورق و ورق-ورق به سطح تحتانی الکتروود پایینی می‌رسد که در این صفحه ولتاژ الکتریکی صفر اعمال گردیده است. دمای آب در کانال الکتروود در تمامی سیکل‌های فرآیند ثابت و به میزان ۲۵ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. سطوحی که با هوا در تماس می‌باشند ضریب جابجایی همرفت  $12 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$  دارند. همچنین دمای هوای اتاق نیز ۲۰ درجه سانتی‌گراد منظور شده است. بعلاوه، نیروی الکتروود نیز به صورت یک بار فشاری یکنواخت بر الکتروود بالایی و پایینی اعمال گردیده است که در شکل ۳ با نیروی  $P$  مشخص شده است.

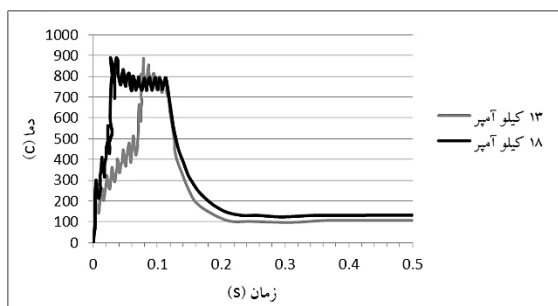


شکل ۳- شرایط مرزی مورد استفاده در مدل المان محدود

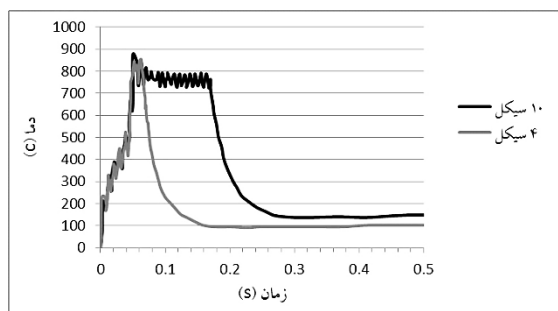
جدول ۴- مقایسه قطر دکمه جوش حاصل از مدل المان محدود با نتایج تجربی

جریان مستقیم			جریان متناوب			شدت جریان KA
درصد خطا	آزمایش تجربی (mm)	شبیه سازی (mm)	درصد خطا	آزمایش تجربی (mm)	شبیه سازی (mm)	
۲/۵	۳/۹	۳/۸	۲/۸	۳/۶	۳/۵	۱۳
۲/۷	۴/۴	۴/۲۸	۵	۴	۳/۸	۱۵
۱/۲	۵	۵/۰۶	۰/۸	۴/۶	۴/۵۶	۱۷
۳/۳	۶	۵/۸	۶/۸	۵/۸	۵/۴	۱۹

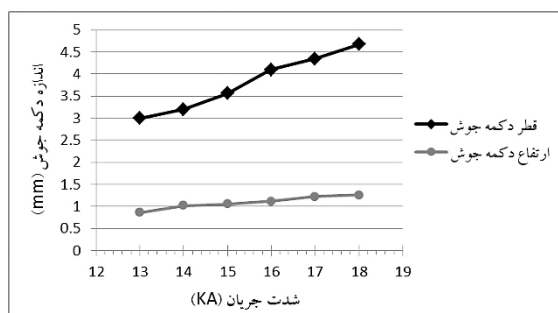
نمودارها در صورتی که شدت جریان یا زمان اعمال جریان از حد مشخصی بیشتر گردند، بر اثر تولید حرارت زیاد و رشد بیش از حد دکمه‌ی جوش یا پاشش مذاب اتفاق می‌افتد و یا ناحیه‌ی جوشکاری ضعیف شده و سوراخ می‌شود.



شکل ۶- تاثیر شدت جریان بر ایجاد حرارت در ناحیه‌ی جوش



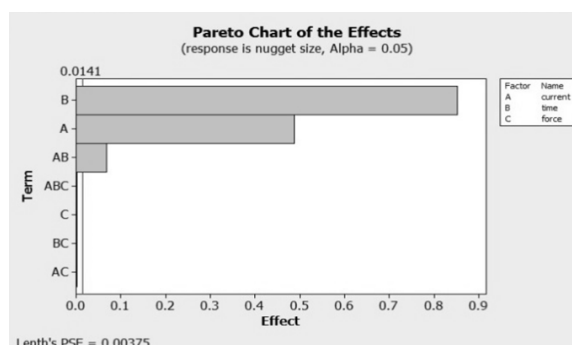
شکل ۷- اثر زمان اعمال جریان بر حرارت تولید شده در ناحیه جوشکاری



شکل ۸- بررسی اثر شدت جریان بر اندازه‌ی دکمه‌ی جوش

## ۶- نتایج

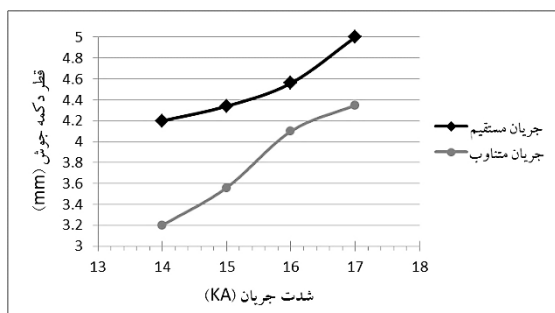
با توجه به طراحی آزمایش انجام شده دریافتیم که به ترتیب زمان اعمال جریان، شدت جریان و تعامل جریان- زمان بیشترین تاثیر را بر اندازه‌ی دکمه‌ی جوش دارند. در این میان تاثیر نیرو و زمان اعمال آن بر اندازه‌ی دکمه‌ی جوش بسیار ناچیز می‌باشد (شکل ۵).



شکل ۵- نحوه تأثیر پارامترهای جوش نقطه‌ای بر اندازه دکمه‌ی جوش

بر اساس قانون ژول با افزایش شدت جریان و یا زمان اعمال جریان، حرارت بیشتری در ناحیه جوش تولید می‌شود. زمانی که دما از نقطه‌ی ذوب عبور می‌کند در دمای ثابت ناحیه‌ی مذاب توسعه می‌یابد (شکل‌های ۶ و ۷) و سبب بزرگ شدن اندازه‌ی دکمه‌ی جوش می‌شود. با استناد به توضیحات بیان شده و توجه به شکل ۸ می‌توان دریافت که با افزایش شدت جریان قطر و ارتفاع دکمه‌ی جوش افزایش می‌یابد. همچنین شکل ۹ نشان می‌دهد، با افزایش زمان جوشکاری نیز قطر و ارتفاع دکمه‌ی جوش افزایش می‌یابد. زیرا با افزایش شدت جریان و زمان اعمال آن، حرارت بیشتری در منطقه‌ی جوش ایجاد شده و سبب رشد دکمه‌ی جوش خواهد شد. با توجه به روند صعودی

با توجه به نتایج بدست آمده در پارامترهای یکسان منبع جریان مستقیم (DC) نسبت به منبع جریان متناوب (AC) دکمه‌ی جوش بزرگ‌تری را ایجاد می‌کند که در شکل ۱۱ به درستی قابل مشاهده است. در منبع جریان AC به دلیل فرکانس پایین و تغییر فاز به صورت مثبت، صفر و منفی مدت زمان جوشکاری افزایش می‌یابد این موضوع سبب می‌شود تا انرژی بیشتری نیز مصرف شود اما منبع DC می‌تواند در زمان کوتاه‌تری عملیات جوشکاری را انجام دهد و انرژی کمتری مصرف می‌کند که این امر به دلیل پایداری و فرکانس بالای این منبع می‌باشد. در نتیجه جریان مستقیم می‌تواند در شرایط برابر حرارت بیشتری تولید کرده و سبب رشد بیشتر دکمه‌ی جوش گردد.



شکل ۱۱- قطر دکمه‌ی جوش بدست آمده با استفاده از دو منبع جریان متناوب و مستقیم

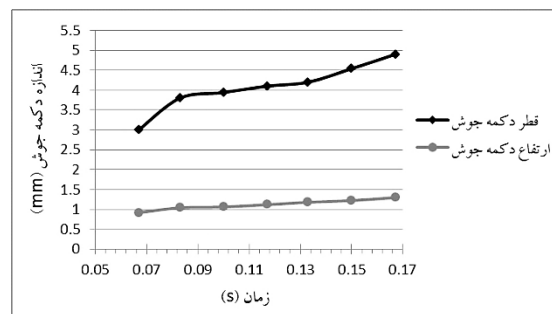
## ۷- جمع‌بندی

مدل المان محدود تهیه شده توانایی پیش‌بینی روند تولید و توزیع حرارت و اندازه‌ی دکمه‌ی جوش در ورق AZ31 منیزیم، جوشکاری شده با فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای را دارد. این شبیه‌سازی با استفاده از نتایج آزمایش‌های تجربی روی منیزیم مورد بررسی قرار گرفت و نشان داد که نتایج المان محدود نزدیکی خوبی با نتایج تجربی دارند.

◀ با اعمال جریان الکتریکی دما در ورق‌ها افزایش

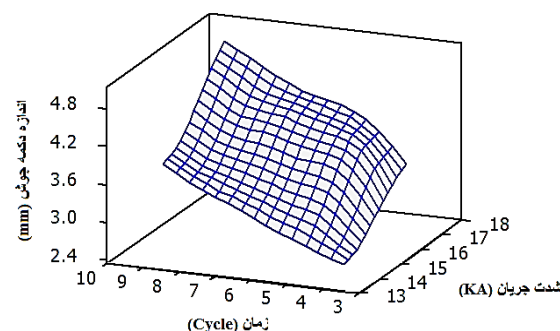
پیدا کرده تا به دمای ذوب برسد در این زمان

حوضچه‌ی ذوب شکل گرفته و از این لحظه به



شکل ۹- بررسی اثر زمان اعمال جریان بر اندازه‌ی دکمه‌ی جوش

مطالعه‌ی نیروی جوشکاری و زمان اعمال آن نشان داد، اندازه‌ی دکمه‌ی جوش برای تمامی آزمایش‌ها ثابت و برابر ۴/۱mm قطر و ۱/۱۲mm ارتفاع بوده است. این موضوع نشان می‌دهد نیروی جوشکاری بر اندازه‌ی دکمه‌ی جوش تأثیری ندارد زیرا نیرو تنها بر تماس بین دو سطح موثر است و همواره نیروی استفاده شده، سطوح را در سطح مناسبی از تماس قرار می‌دهد و نیروی بیشتر خیلی تأثیرگذار نخواهد بود. با توضیحات بیان شده و همچنین زمان بسیار کم جوشکاری درمی‌یابیم که زمان اعمال نیرو نیز بر اندازه‌ی دکمه‌ی جوش موثر نمی‌باشد. شکل ۱۰ تأثیر تعامل دو پارامتر شدت جریان و زمان را روی اندازه‌ی دکمه‌ی جوش نمایش می‌دهد. همانطور که از شکل ۱۰ مشخص است با افزایش شدت جریان و زمان جوشکاری اندازه‌ی دکمه‌ی جوش افزایش می‌یابد پس بزرگ‌ترین دکمه‌ی جوش در بیشترین شدت جریان و زمان جوشکاری و کوچک‌ترین دکمه‌ی جوش در کمترین شدت جریان و زمان جوشکاری حاصل می‌شود.



شکل ۱۰- تأثیر تعامل شدت جریان و زمان جوشکاری بر اندازه‌ی دکمه‌ی جوش

دکمه‌ی جوش بی‌تأثیر می‌باشد. زیرا این عوامل روی روند تولید و توسعه‌ی حرارت تأثیر چندانی ندارند.

◀ مطالعه‌ی تعامل پارامترها نشان داد که تعامل شدت جریان و زمان جوشکاری یکی از موثرترین عوامل بر اندازه‌ی دکمه‌ی جوش می‌باشد به گونه‌ای که بزرگترین دکمه‌ی جوش در بالاترین شدت جریان و بیشترین زمان جوشکاری بدست می‌آید.

◀ بررسی نتایج نشان می‌دهد، در شرایط مساوی جریان مستقیم (DC) نسبت به متناوب (AC) دکمه‌ی جوش بزرگتری ایجاد می‌کند زیرا جریان مستقیم نسبت به متناوب، می‌تواند در شدت جریان و زمان برابر، حرارت بیشتری در موضع جوشکاری تولید نماید.

بعد در دمای ثابت ناحیه‌ی مذاب توسعه یافته و دکمه‌ی جوش رشد می‌کند. بررسی‌ها نشان می‌دهد بیشترین دما در مرکز جوش اتفاق می‌افتد و با فاصله گرفتن از مرکز دما کاهش می‌یابد.

◀ بر اساس نتایج بدست آمده از تحلیل DOE و شبیه‌سازی، زمان اعمال جریان بیشترین اثر را بر اندازه‌ی دکمه‌ی جوش دارد. افزایش زمان اعمال جریان با تولید حرارت بیشتر باعث افزایش اندازه‌ی دکمه‌ی جوش می‌شود

◀ افزایش شدت جریان باعث می‌شود حرارت بیشتری در ناحیه‌ی جوشکاری تولید گردد در نتیجه سبب افزایش اندازه‌ی دکمه‌ی جوش خواهد شد.

◀ بررسی‌ها نشان می‌دهد که نیروی الکتروود و زمان اعمال نیرو (زمان نگهداری) روی اندازه‌ی

## ۸- مراجع

- [1]. Munitz, A., Kohn, G., Cotler, C. (2002). "Resistance spot welding of Mg-AM50 and Mg-AZ91D alloys". TMS (The Minerals, Metals & Materials Society).
- [2]. Wang, Y., Feng, J., Zhang, Z. (2005). "Influence of Surface Condition on Expulsion in Spot Welding AZ31B Magnesium Alloy". J. Mater. Sci. Technol., Vol. 21, No. 5, pp. 749-752.
- [3]. Sun, D.Q., Lang, B., Sun, D.X., Li, J.B. (2007). "Microstructures and mechanical properties of resistance spot welded magnesium alloy joints". Materials Science and Engineering A, Vol. 460-461, pp. 494-498.
- [4]. Liu, L., Zhou, S.Q., Tian, Y.H., Feng, J.C., Jung, J.P., Zhou, Y.N. (2009). "Effects of surface conditions on resistance spot welding of Mg alloy AZ31". Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 14, No. 4, pp. 356-361.
- [5]. Liu, L., Xiao, L., Feng, J.C., Tian, Y.H., Zhou, S.Q., Zhou, Y. (2010). "Resistance Spot Welded AZ31 Magnesium Alloys, Part II: Effects of Welding Current on Microstructure and Mechanical Properties". Metallurgical And Materials Transactions A, Vol. 41 A, pp. 2641-2650.
- [6]. Zhou, S., Liu, L., Jung, J.P., Lee, M.Y., Norman Zhou, Y. (2010). "Effects of Welding Parameters and Surface Pretreatments on Resistance Spot Welding of AZ31B Mg Alloy". Met. Mater. Int., Vol. 16, No. 6, pp. 967-974.
- [7]. Shi, H., Qiu, R., Zhu, J., Zhang, K., Yu, H., Ding, G. (2010). "Effects of welding parameters on the characteristics of magnesium alloy joint welded by resistance spot welding with cover plates". Materials and Design, Vol. 31, pp. 4853-4857.
- [8]. Xiao, L., Liu, L., Zhou, Y., Esmaeili, S. (2010). "Resistance-Spot-Welded AZ31 Magnesium Alloys: Part I. Dependence of Fusion Zone Microstructures on Second-Phase Particles". Metallurgical And Materials Transactions A, Vol. 41 A, pp. 1511-1522.



- [9]. Xiao, L., Liu, L., Chen, D.L., Esmaeili, S., Zhou, Y. (2011). "Resistance spot weld fatigue behavior and dislocation substructures in two different heats of AZ31 magnesium alloy". *Materials Science and Engineering A*, Vol. 529, pp. 81– 87.
- [10]. Hwang, I.S., Kim, D.C., Kang, M.J. (2011). "Inverter DC resistance spot welding of magnesium alloy AZ31". *Archives of Materials Science and Engineering*, Vol. 48, issue. 2, pp. 112-117.
- [11]. Behraves, S.B., Jahed H., Lambert S. (2011). "Characterization of magnesium spot welds under tensile and cyclic loadings". *Materials and Design*, Vol. 32, pp. 4890–4900.
- [12]. Kishore Babu, N., Brauser, S., Rethmeier, M., Cross, C.E. (2012). "Characterization of microstructure and deformation behaviour of resistance spot welded AZ31 magnesium alloy". *Materials Science and Engineering A*, Vol. 549, pp. 149– 156.
- [13]. Montiel, D., Liu, L., Xiao, L., Zhou, Y., Provatas, N. (2012). "Microstructure analysis of AZ31 magnesium alloy welds using phase-field models". *Acta Materialia*, Vol. 60, pp. 5925–5932.
- [14]. Yang, H., Huang, L., Zhan, M. (2011). "Hot Forming Characteristics of Magnesium Alloy AZ31 and Three-Dimensional FE Modeling and Simulation of the Hot Splitting Spinning Process". *Magnesium Alloys -Design, Processing and Properties*, Frank Czerwinski (Ed.).
- [15]. Ding-fei, Zh., Qing-wei, D., Lin, F., Jun-ping, Zh. (2011). "Simulation and confirmatory experiment on rolling of magnesium alloy sheets with temperature gradient". *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, Vol. 21, No. 1, pp. 185-190.
- [16]. Rohsenow, W.M., Hartnett, J.R., Cho, Y.I. (1998). "Handbook of Heat Transfer". 3rd ed., McGraw-Hill, New York.
- [17]. Cha, B.W., Na, S.J. (2003). "A study on the relationship between welding conditions and residual stress of resistance spot welded 304-type stainless steels". *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 22, Issue 3, pp. 181-189.